Caen 1973

R. BROU
1 Gennaio 1973
Il Nuovo Cimento
Serie 11, Vol. **13** A, pag. 257-766

R. BROU

Sections efficaces d'annihilations antiprotons-noyaux à 3 GeV/c variation avec le nombre de masse.

TIPOGRAFIA COMPOSITORI
BOLOGNA
1973

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Sections efficaces d'annihilations antiprotons-noyaux à 3 GeV/c variation avec le nombre de masse (*).

R. Brou

Laboratoire de Physique Corpusculaire de l'Université - Caen

(ricevuto il 14 Marzo 1972)

Summary. — The analysis by three different methods of stars created in ionographic emulsion by proton and antiproton beams of 3 GeV/c give an agreement in the estimation of the antiproton annihilations on complex nuclei at about 50%. Experimental annihilation cross-sections on hydrogen (26.1 ± 6.8) mb, light nuclei CNO (186 ± 83) mb and heavy nuclei AgBr (681 ± 100) mb are compared with theoretical calculations of the granular nucleus model.

Introduction.

L'étude des interactions élastiques des protons et des antiprotons dans l'émulsion nucléaire [1] nous a conduit à dissocier les annihilations des autres événements inélastiques produits par les antiprotons en vol. Pour étudier ce canal d'annihilation sur les noyaux lourds, nous comparons les étoiles créées dans l'émulsion par un faisceau de protons d'énergie incidente de 2.2 GeV et par un faisceau d'antiprotons de même énergie.

Les événements sont localisés par suivage au microscope de la trace ionographique de la particule incidente. Les traces secondaires sont classées en trois catégories: les traces blanches dont l'ionisation est inférieure à 1.4 fois le minimum, les traces grises d'ionisation comprise entre 1.4 et 6 fois le minimum et les traces noires d'ionisation supérieure à 6 fois le minimum.

(*) Pour accélérer la publication, l'auteur de cet article a agréé à ne pas recevoir les épreuves pour la correction.

(1) J. Bermond, R. Brou, M. Flard and J. Le Querler: *Journ. de Phys.*, **29**, 402 (1968).

L'ensemble des résultats obtenus pour les deux dépouillements est résumé dans le Tableau I.

TABLEAU I.

	Antiprotons	Protons
Nb. d'étoiles observées	678	691
Nb. moyen de branches blanches	2.38 ± 0.06	0.83 ± 0.03
Nb. moyen de branches grises	2.69 ± 0.06	2.70 ± 0.06
Nb. moyen de branches noires	5.76 ± 0.09	5.62 ± 0.09
Nb. moyen de branches grises et noires	8.52 ± 0.11	8.32 ± 0.11
Libre parcours moyen (cm)	26.8 ± 1.0	36.0 ± 3.2

1. – Interactions antiprotons-nucléons.

Aucune étoile blanche (étoile ne comportant que des traces blanches) n'a été trouvée dans le dépouillement des protons. Par contre on en a découvert 34 dans le suivage des antiprotons. Les interactions élastiques ou quasi-élastiques étant éliminées par analyse cinématique, on peut raisonnablement penser que les événements restants sont des annihilations. Dans l'hypothèse d'un choc de l'incident sur un nucléon libre (hydrogène de l'émulsion) ou quasi-libre, on peut calculer les sections efficaces d'interaction. Nos résultats provenant d'une statistique pauvre sont donnés avec une grande marge d'incertitude, mais

TABLEAU II. – *Sections efficaces* $\bar{p}$-p *en millibarn.*

Nb. de branches	Nos résultats 3 GeV/c	FERBEL *et al.* [2] 3.28 GeV/c	BALTAY [3] 3 GeV/c
0	8.5 ± 3.8	4.0 ± 0.4	
2	10.2 ± 4.2	9.9 ± 1.3	10.20 ± 0.75
4	17.1 ± 5.4	17.5 ± 0.7	
6	5.1 ± 2.9	6.2 ± 0.4	

comparés (Tableau II) avec les résultats obtenus dans les chambres à bulles pour des antiprotons de même énergie ou d'énergie voisine, ils confirment l'importance du canal d'annihilation en pions.

[2] T. FERBEL, G. FIRESTONE, J. SANDWEISS, H. D. TAFT, M. GAILLOUD, T. W. MORRIS, A. H. BACHMAN, P. BAUMEL and R. M. LEA: *Phys. Rev.*, **137**, B 1250 (1965).
[3] C. BALTAY *et al.*: *Nuclear Structure, Proceedings of the International Conference* (Stanford, Calif., 1964).

2. – Interactions protons-noyaux et antiprotons-noyaux.

On peut s'attendre à ce que les annihilations provoquent une multiplicité plus grande que les autre événements inélastiques, par suite la paramétrisation selon le nombre de traces de particules secondaires relativistes permet une certaine sélection des événements.

La répartition des étoiles suivant les paramètres

a) N_s = nombre total de traces fines,

b) N_H = nombre total de traces grises et noires par étoile,

est représentée sur les Fig. 1 et 1 bis.

Certaines des étoiles produites par les antiprotons ont soit N_s soit N_H soit N_s et N_H supérieures au paramètre correspondant pour l'irradiation des protons; on peut en déduire qu'il existe une grande probabilité pour que ces étoiles comportent au moins une annihilation. Soit C l'ensemble de ces étoiles.

Le coefficient de corrélation r entre N_s et N_H et les rapports de corrélation η_{NH} de N_H par rapport à N_s et η_{Ns} de N_s par rapport à N_H sont calculés (Tableau III) pour les événements provoqués par les protons, les antiprotons et pour les étoiles (présumées d'annihilation) du groupe C.

TABLEAU III.

	Protons	Antiprotons	Antiprotons (C)
$\bar{N}_H$	8.32	8.52	12.04
$\bar{N}_s$	1.232	2.446	3.638
r	— 0.273	— 0.057	— 0.407
η^2_{NH}	0.088	0.025	0.653
η^2_{Ns}	0.107	0.072	0.410

Il apparait une forte corrélation entre N_s et N_H pour les protons, propriété déjà remarquée par d'autres auteurs [4-7] ainsi que pour les étoiles C, mais faible pour l'ensemble des antiprotons. On déduit de cette faible valeur de r que les courbes de régressions des phénoménes inélastiques d'une part et des phénomènes d'annihilation d'autre part sont assez éloignées l'une de l'autre.

---

(4) R. R. DANIEL, N. KAMESWARA RAO, P. K. MALHOTRA and Y. TSUZUKI: *Nuovo Cimento*, **16**, 1 (1960).

(5) C. BRICMAN, M. CSEJTHEY-BARTH, J. P. LAGNAUX et J. SACTON: *Nuovo Cimento*, **20**, 1017 (1961).

(6) H. MEYER, M. W. TEUCHER et E. LOHRMANN: *Nuovo Cimento*, **28**, 1399 (1963).

(7) A. BARBARO-GALTIERI, A. MANFREDINI, B. QUASSIATI, C. CASTAGNOLI, A. GAINOTTI et I. ORTALLI: *Nuovo Cimento*, **21**, 469 (1961).

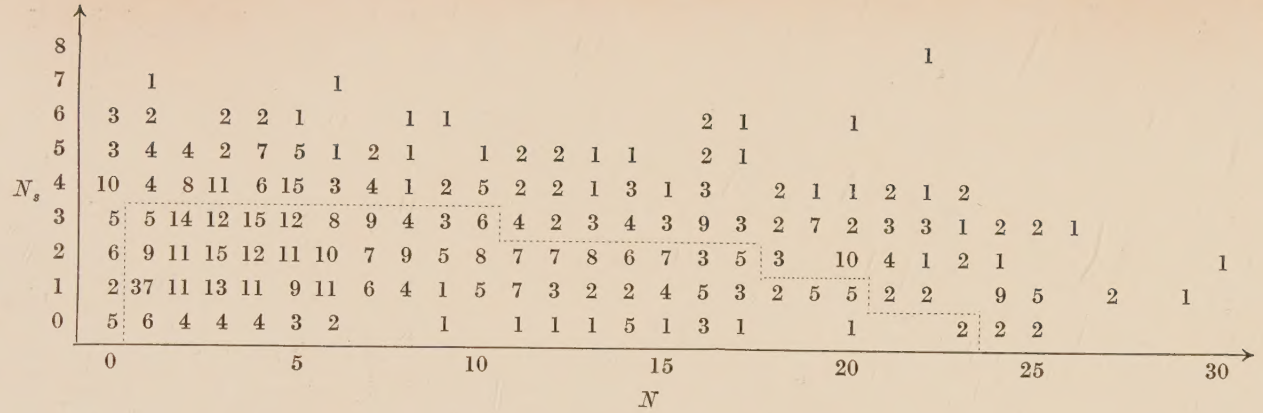

Fig. 1. – Antiprotons de 2.2 GeV.

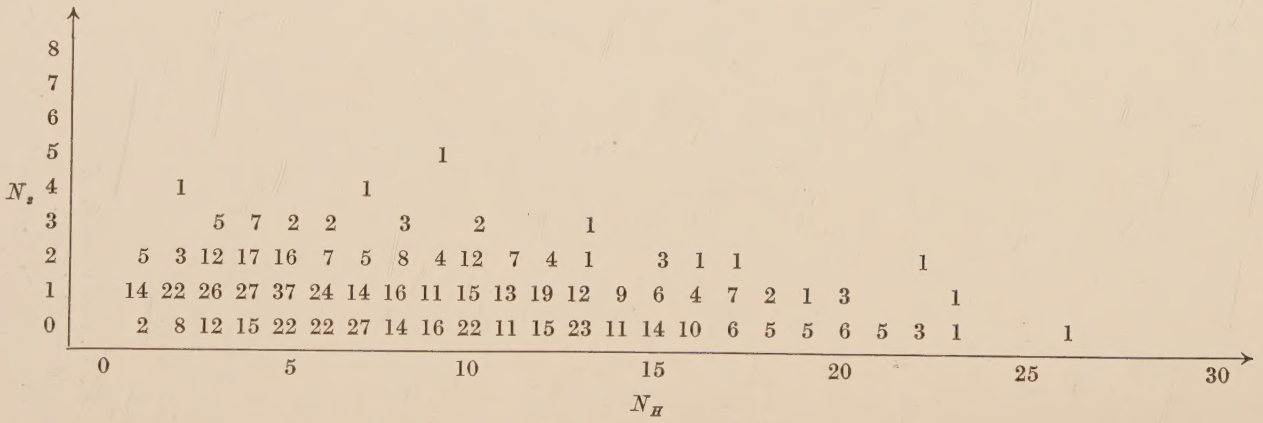

Fig. 1 bis. – Protons da 2.2 GeV.

Les étoiles d'antiprotons se comportent comme un mélange d'étoiles d'origine inélastique ou d'annihilation; la faible valeur de r dans ce mélange indique que le nombre des secondaires au minimum d'ionisation dépend strictement de son origine propre.

Par suite si l'on suppose que le nombre moyen de traces fines, sans présumer de la nature des particules ni de leur spectre énergétique, est identique dans les réactions purement inélastiques des nucléons et des antinucléons, la connaissance du nombre moyen de traces fines émises lors des annihilations permet de déterminer le pourcentage d'annihilation.

Posons:

$N(P)$ le nombre moyen de traces fines des étoiles de protons,

$N(C)$ le nombre moyen de traces fines des étoiles d'antiprotons du group C (annihilations),

$N(D)$ le nombre moyen de traces fines des autres étoiles d'antiprotons,

on a

$$x = \frac{N(D) - N(P)}{N(C) - N(P)}.$$

L'application numérique donne finalment un pourcentage d'annihilation de $x = (31 \pm 7)\,\%$ pour l'ensemble des événements du groupe D (mélange de réactions inélastiques pures et d'annihilation). On en déduit immédiatement la proportion totale d'annihilation sur l'ensemble des noyaux: $(58 \pm 9)\,\%$.

3. – Distribution angulaire des traces fines.

Soit $\overline{P}(\theta_i)$ le nombre de traces fines des secondaires des étoiles d'antiprotons dans l'intervalle $\theta_i + \Delta\theta$ ($\Delta\theta = 10°$). Désignons par $P(\theta_i)$ le nombre de traces fines des secondaires des étoiles de protons pour une même longueur suivie, et par $C(\theta)$ la distribution angulaire des étoiles du groupe C.

Les distributions $\overline{P}(\theta)$, $P(\theta)$, $C(\theta)$ et $D(\theta) = \overline{P}(\theta) - P(\theta)$ sont représentées sur la Fig. 2. On vérifie facilement qu'on passe de $C(\theta)$ à $D(\theta)$ par une affinité simple. Nous faisons l'hypothèse que, dans chaque intervalle d'angle, les proportions relatives de branches suivant le nombre j de secondaires visibles sont conservées; par suite si l'on connait ces proportions pour chaque classe θ_i on en déduira le nombre total.

Soit K le coefficient d'affinité

$$K(\theta_i) = C(\theta_i)/D(\theta_i) \qquad \text{avec } K(\theta_i) \neq K(\theta_{i+1}) \neq \ldots,$$

$$D(\theta_i) = \sum_{j=1}^{8} D_j(\theta_i),$$

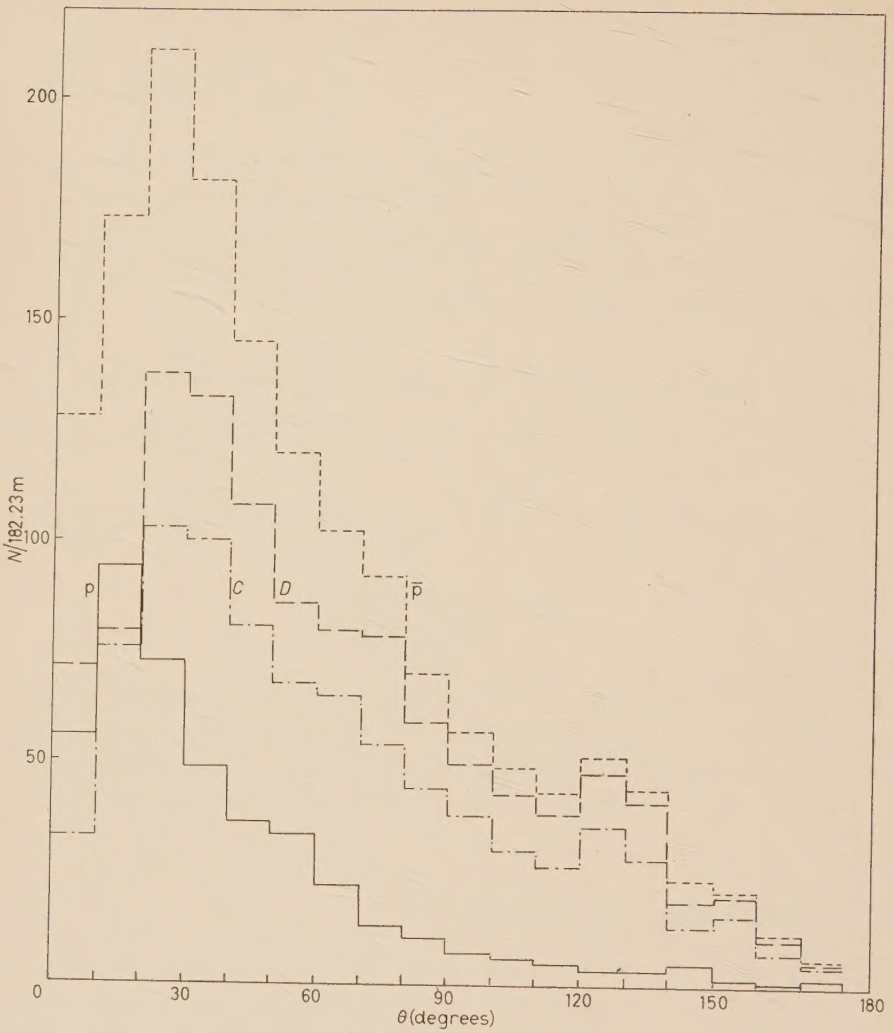

Fig. 2. – Distribution angulaire des branches fines de étoilés.

par suite $C_j(\theta_i) = K(\theta_i) \cdot D_j(\theta_i)$ et le nombre d'étoiles d'annihilation pour chaque classe j sera

$$A_j = j^{-1} \sum_{i=1}^{18} C_j(\theta_i),$$

le nombre total

$$A = \sum_{j=1}^{8} A_j = 306.4 \pm 57.8 \qquad \text{soit } (50 \pm 10)\,\%.$$

4. – Sections efficaces d'annihilation en fonction de A.

4·1. *Modèle granulaire.* – STEENBERG [8] a proposé un modèle dérivé de l'optique où les noyaux sont considérés comme un ensemble granulaire. La cible est représentée comme un assemblage aléatoire de A sphères absorbantes confinées dans un rayon $R = R_0 A^{\frac{1}{3}}$.

L'étude des propriétés d'un tel système, compte tenu des approximations faites en haute énergie (on néglige en particulier le scattering coulombien et les effets dépendant du spin) conduit à une expression très simple de la section efficace d'absorption sur un noyau A:

$$\sigma_a(A) = \sigma_a(1) A^n .$$

$\sigma_a(1)$ est la section efficace d'absorption nucléon-nucléon et n un paramètre de la forme

$$n = \frac{2}{3} + \frac{1}{3}\left(1 - \frac{\sigma_a(1)}{\sigma_0}\right)^2 \qquad \text{avec } \sigma_0 = \pi R_0^2 .$$

A la section efficace purement inélastique des antiprotons s'ajoute la section efficace d'annihilation:

$$\sigma_{ab}(1) = \sigma_i(1) + \sigma_{an}(1) .$$

Nous supposons qu'il existe une relation de la forme $\sigma_{ab}(A) = \sigma_{ab}(1) A^{n'}$ entre les sections efficaces d'absorption totale des antiprotons et que $\sigma_i(A) = \sigma_i(1) A^n$.

Le modèle ne faisant appel qu'à une analyse géométrique et non à une étude du mécanisme, nous posons

$$n' = \frac{2}{3} + \frac{1}{3}\left(1 - \frac{\sigma_{ab}}{\sigma_0}\right)^2 .$$

Pour déterminer σ_{an} nous supposons connu le rapport k des sections efficaces purement inélastiques $\bar{\text{p}}$-p et p-p [3,9] qui est de 0.68 à 2.2 GeV. Le calcul de n' s'effectue à partir du libre parcours moyen des antiprotons et celui de n à partir du libre parcours moyen des protons.

La section efficace géométrique σ_0 est calculée en utilisant le rayon d'interaction R_0 trouvé dans un précédent travail [1].

---

[8] N. R. STEENBERG: *Nucl. Phys.*, **32**, 381 (1962); **35**, 455 (1962).
[9] S. KATCOFF: *Phys. Rev.*, **157**, 1126 (1967).

L'ajustement donne

$$n' = 0.667^{+0.014}_{-0.001}, \qquad n = 0.696^{+0.093}_{-0.030},$$

soit

$$\sigma_{ip} = (41^{+9}_{-14})\ \text{mb}, \qquad \sigma_{\text{abs p}} = (62^{+3}_{-4})\ \text{mb} \qquad \text{et} \qquad \sigma_{\text{an}}(\bar{\text{p}}\text{-p}) = (34^{+14}_{-12})\ \text{mb}.$$

Avec les hypothèses précédentes, on écrit la section efficace d'annihilation pour un noyau A sous la forme

$$\sigma_{\text{an}}(A) = \sigma_{\text{an}}(1)A^{n'} - k\sigma_i(1)(A^n - A^{n'})N\sigma_{\text{an}}(1)A^x.$$

Les sections efficaces (en mb) calculées pour différents noyaux sont consignées dans le Tableau IV.

La proportion d'annihilation trouvée par ce procédé est de $(48 \pm 14)\,\%$ sur l'ensemble des évènements des étoiles d'antiprotons.

TABLEAU IV.

A		Protons	Antiprotons		
		σ_i	σ_{abs}	σ_{an}	
C	12	205	326	167 ± 36	181 ± 40
N	14	232	362	185 ± 41	
O	16	259	395	201 ± 46	
Br	80	940	1157	562 ± 170	620 ± 195
Ag	108	1196	1414	679 ± 217	

4·2. *Séparation des interactions sur les noyaux.* – Une séparation des interactions sur noyaux légers (CNO) et lourds (Br Ag), permet de confronter directement ces résultats avec l'expérience.

Le principe de la sélection des évènements est la quasi invariance des barrières de potentiel des noyaux lourds avant et après un choc ([10,11]).

On considère qu'une interaction a lieu sur un noyau léger dans l'un des cas suivants:

1) si le nombre N_H de branches grises et noires est inférieur ou égal à 10 et si, en l'absence de recul (inférieur à 10 μm), il y a au moins une trace entre 10 et 50 μm (émission probable d'un ou plusieurs α d'énergie inférieure à 9 MeV);

([10]) P. DEMERS: *Ionographie*, Vol. **1** (Ottawa, 1958), p. 261.
([11]) R. MCKEAGUE: *Proc. Roy. Soc.*, A **236**, 104 (1956).

2) s'il y a exclusivement deux ou plusieurs reculs de moins de 5 μm provenant selon toute vraisemblance de la fragmentation d'un noyau léger;

3) s'il n'y a aucune trace noire mais seulement des traces grises (émission protonique) et fines.

L'application de ce critère conduit aux sections efficaces expérimentales du Tableau V.

TABLEAU V. – *Sections efficaces en millibarn à* 3 GeV/c.

Incident	Interaction	H	CNO	AgBr
p	inélastique		211 ± 18	1104 ± 47
$\bar{p}$	inélastique + annihilation		288 ± 23	1378 ± 61
	annihilation	26.1 ± 6.8	186 ± 83	681 ± 100

Ces résultats sont en assez bon accord avec les prévisions du modèle granulaire tel que nous l'avons utilisé.

5. – Conclusion.

En comparant dans les interactions de protons et d'antiprotons, les caractères distinctifs des traces fines, leur distribution angulaire et les paramètres du modèle de Steenberg, nous avons trouvé qu'en moyenne une étoile sur deux provoquée par un antiproton de 3 GeV/c contient au moins une annihilation. Les annihilations se produisent dans 70 % des cas sur les noyaux lourds et 90 % engendrent des cascades.

La section efficace d'annihilation d'un noyau de masse A peut se mettre sous la forme $\sigma_{an}(A) = \sigma_{an}(1) \cdot A^x$ avec $x = 0.64 \pm 0.07$.

Cette valeur est identique à celle trouvée par ALLABY *et coll.* [12] pour des énergies beaucoup plus élevées. A notre énergie le libre parcours moyen des antiprotons dans la matière nucléaire est de l'ordre de 0.84 fm, il est donc raisonnable de penser que l'on puisse appliquer [13] aux antiprotons le modèle de diffraction ($x = \frac{2}{3}$).

* * *

Nous tenons à exprimer notre reconnaissance à Monsieur Le Prof. M. SCHERER, directeur du Laboratoire de Physique Corpuscolaire, pour l'intérêt constant qu'il a porté à ce travail, ainsi qu'à Monsieur J. BERMOND pour son aide et ses encouragements.

[12] J. V. ALLABY *et al.*: *Lund International Conference of Elementary Particles* (1969).
[13] A. Y. ABUL-MAGD, G. ALBERI et L. BERTOCCHI: *Phys. Lett.*, **30**, B 182 (1969).

● RÉSUMÉ

Trois différentes méthodes d'analyse des étoiles engendrées par des protons et des antiprotons de 3 GeV/c concordent pour estimer à environ 50% la proportion des annihilations des antiprotons sur les noyaux complexes de l'émulsion ionographique. Les sections efficaces expérimentales d'annihilation sur l'hydrogène (26.1 ± 6.8) mb, les noyaux légers CNO (186 ± 83) mb et les noyaux lourds AgBr (681 ± 100) mb sont comparées à celles calculées au moyen du modèle granulaire du noyau.

● RIASSUNTO (*)

Tre diversi metodi di analisi delle stelle generate da protoni ed antiprotoni di 3 GeV/c concordano nel portare alla stima di circa il 50% per la proporzione delle annichilazioni di antiprotoni sui nuclei complessi dell'emulsione ionografica. Si confrontano le sezioni efficaci sperimentali di annichilazione sull'idrogeno (26.1 ± 6.8) mb, i nuclei leggeri CNO (186 ± 83) mb ed i nuclei pesanti AgBr (681 ± 100) mb con quelle calcolate mediante il modello granulare del nucleo.

(*) *Traduzione a cura della Redazione.*

Эффективные сечения аннигиляции антипротонов на ядрах при 3 ГэВ/с. Зависимость от массового числа.

Резюме (*). — Три различных метода анализа событий, рожденных протонами и антипротонами с импульсом 3 ГэВ/с дают согласованную оценку приблизительно 50% для отношения аннигиляции антипротонов в сложных ядрах ядерной эмульсии. Экспериментальные эффективные сечения аннигиляции в водороде (26.1±6.8) мб, в легких ядрах CNO (186±83) мб и в тяжелых ядрах AgBr (681±100) мб сравниваются с вычислениями, проведенными с помощью зернистой модели ядра.

(*) *Переведено редакцией.*

R. BROU
1 Gennaio 1973
Il Nuovo Cimento
Serie 11, Vol. **13** A, pag. 257-266